冰冻圈遥感：助力“三极”大科学计划

车 涛[1,2*] 李 新[2,3] 李新武[4] 江利明[5,6]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 黑河遥感试验研究站 兰州 730000
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
3 中国科学院青藏高原研究所 国家青藏高原科学数据中心 北京 100101
4 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094
5 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室 武汉 430077
6 中国科学院大学 地球与行星科学学院 北京 100049

摘要 冰冻圈遥感学是冰冻圈科学体系中的一个重要分支，也是一门新型的交叉学科。文章对冰冻圈遥感学的研究对象及基本遥感方法进行了概述，并通过典型案例介绍了冰冻圈遥感的总体进展，重点对我国冰冻圈遥感的发展现状进行了简要描述。最后对冰冻圈遥感学的发展提出了建议，探讨了冰冻圈遥感助力我国即将开展的“三极”大科学计划。

关键词 冰冻圈，遥感，三极，科学计划

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200323001

冰冻圈是地球气候系统五大圈层之一，其组成包括冰川（含冰盖）、冻土、积雪、河冰、湖冰、海冰、冰架、冰山，以及大气圈内的冰晶和过冷水云、降雪、冰雹与霰。冰冻圈的变化与气候、水循环和生态系统的变化有密切关系，其不仅直接影响全球气候、海平面、湖泊和河流的变化，还会对生态与环境及社会经济可持续发展带来影响，因此冰冻圈科学在地球科学和人文科学中有着特殊地位[1]。

冰冻圈科学主要研究自然背景条件下地球冰冻圈各组成要素的形成、发育、演化规律，以及各要素之间相互作用的过程；冰冻圈各要素和整体与气候系统其他圈层之间的相互作用、转化和影响；冰冻圈与经济社会可持续发展之间的关系——特别是全球和区域冰冻圈变化的适应、减缓和对策[2]。

冰冻圈各要素主要分布在高纬度和高海拔地区，开展地面观测较困难，难以布设高密度观测网络，因

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA019070000）
修改稿收到日期：2020年4月6日

此遥感观测成为冰冻圈研究不可或缺的手段。冰冻圈遥感是指采用非接触式观测手段，获取冰冻圈各要素的几何、物质和能量特性的技术。目前，冰冻圈遥感手段涵盖可见光/近红外、热红外、微波、激光、无线电及重力测量遥感方法。遥感平台以卫星为主，航空和地基遥感也是冰冻圈遥感的重要实验手段，近年来兴起的无人机遥感更是丰富了冰冻圈遥感手段。

冰冻圈遥感学作为冰冻圈科学体系中的一个重要分支，该学科与冰冻圈科学体系中其他分支（如冰冻圈水文学、冰冻圈气候学）相互借鉴、相互促进，但也自成体系[3,4]。本文介绍了冰冻圈遥感学的基本研究内容和方法，进一步回顾国内外冰冻圈遥感的相关研究进展，并分析我国冰冻圈遥感的优势与不足，最后探讨了冰冻圈遥感如何助力“三极”大科学计划。

1 冰冻圈遥感概述

冰冻圈遥感学由遥感科学的基本原理发展而来，其研究对象又是具有特殊电磁波特性的冰冻圈要素。例如，积雪在可见光波段的高反射率与近红外波段的低反射率，这一特性使得利用多光谱遥感可以非常容易将积雪从其他地物中识别出来；又如，液态水在微波波段的介电常数约为80，而在冻结为冰晶时则下降到约为3，这就给利用微波遥感判识土壤或者水体表面是否冻结提供科学的判别标准，如海冰和地表冻融过程。因此，相对于植被、土地利用等遥感，冰冻圈遥感有其特殊的研究方法。

冰冻圈遥感学从研究对象大体可以分为陆地冰冻圈遥感、海洋冰冻圈遥感和大气冰冻圈遥感3个方面。陆地冰冻圈主要包括积雪、冰川与冰盖、冻土及河冰和湖冰，针对其的研究内容和手段最为丰富；海洋冰冻圈主要包括海冰、冰架、冰山等；大气冰冻圈主要是大气圈内的冰晶和过冷水云、降雪、冰雹与霰。表1列出了大部分冰冻圈遥感内容及相应的遥感技术。可以看出，可见光/近红外及合成孔径雷达（SAR）可监测的参数最多，且同一个参数也可以用不同的遥感方法监测。但是，不同的方法优势不同。以雪深遥感反演为例，SAR和微波辐射计都可以反演雪深。微波辐射计虽然空间分辨率低，但可以获取逐日的积雪变化过程。因此，需要根据研究目标选择相应的技术手段。此外，由于每种遥感方法有各自的优、缺点，往往需要联合多源遥感数据开展监测。以积雪面积为例，可见光遥感可以准确获取积雪面积，但受云层影响会缺失很多地表信息，此时可以联合具有穿透性的微波遥感来补充云层下的积雪信息。

2 冰冻圈遥感研究进展

2.1 冰冻圈遥感技术研究进展

冰冻圈遥感始于1961年，但直到1990年以后，随着对地观测技术的飞速发展，冰冻圈遥感才取得了迅猛发展。特别是21世纪以来，新型、先进传感器的涌现，以及专门针对冰冻圈研究的卫星成功发射和运行，如NASA的ICESAT卫星和欧洲航天局CryoSat卫星，使冰冻圈遥感的发展生机勃勃。图1总结了可用于冰冻圈遥感的卫星观测计划。

用于冰冻圈观测的遥感技术主要包括：① *可见光/红外遥感技术*。目前，正朝着长时序、高光谱、高空间和高时间分辨率、大幅宽和三维信息获取等观测能力方向发展。② *微波遥感技术*。作为主动微波遥感核心传感器的SAR技术发展迅速，应用该技术的卫星及后续的雷达卫星任务计划大多具有双站/或星座协同观测、极化干涉测量、三维/四维信息获取、高分宽幅数据采集或超高分辨率观测能力，可实现冰冻圈表面动态过程高精细、大尺度和时间连续的监测与评估。③ *激光、重力及其他新型遥感技术*。激光雷达卫星也从单个点观测向点云观测发展，已有的重力卫星已经在大尺度物质平衡中取得了创新性的进展。未来，该类技术将在提升空间分辨率方面取得突破，其他新型遥感技术（如微光遥感）也尝试用于冰冻圈要

表 1　冰冻圈遥感内容与相应可用的遥感技术

内容			可见光/近红外	热红外	微波辐射计	微波散射计	合成孔径雷达	干涉相干雷达	激光雷达	雷达高度计	无线电波
陆地冰冻圈遥感	积雪遥感	积雪面积	√		√		√				
		积雪反照率	√								
		积雪粒径	√								
		雪表面温度		√							
		雪深和雪水当量			√		√	√	√		
		积雪密度					√				
		积雪湿度				√	√				
	冰川冰盖遥感	冰川面积	√				√				
		冰川地形						√	√	√	
		冰川厚度									√
		冰下地形									√
		雪线	√				√				
		冰舌末端	√				√				
		冰盖前缘	√				√				
		表面温度		√							
		冰面湖和灰冰洞	√				√				
		冰裂隙	√				√		√		
		冰川表面冰碛	√				√				
	冻土遥感	地表冻融状态			√	√	√				
		冻土分布	√	√			√	√			
		冻土形变						√			
		冰缘地貌制图	√	√			√	√			
		活动层									√
	河冰、湖冰遥感	密集度和面积	√			√	√				√
		湖冰厚度			√		√		√		√
		湖冰物候	√		√	√	√				
		冰面温度		√							
		冰塞、凌汛、湖泊溃决	√				√				
海洋冰冻圈遥感	海冰遥感	海冰范围与类型	√		√	√	√				
		海冰密集度	√		√	√	√			√	
		海冰厚度	√		√		√		√	√	
		冰间河	√		√		√			√	
		冰面温度	√	√							
		海冰物候	√	√	√	√	√				
		反照率	√								
	冰架遥感	触地线	√					√			√
		冰山崩解速率	√				√				
		冰山识别和追踪	√			√	√				
大气冰冻圈遥感		冰晶	√								
		过冷云	√				√				
		降雪			√		√				
		冰雹和霰	√								

√，该技术已应用于对应的研究领域

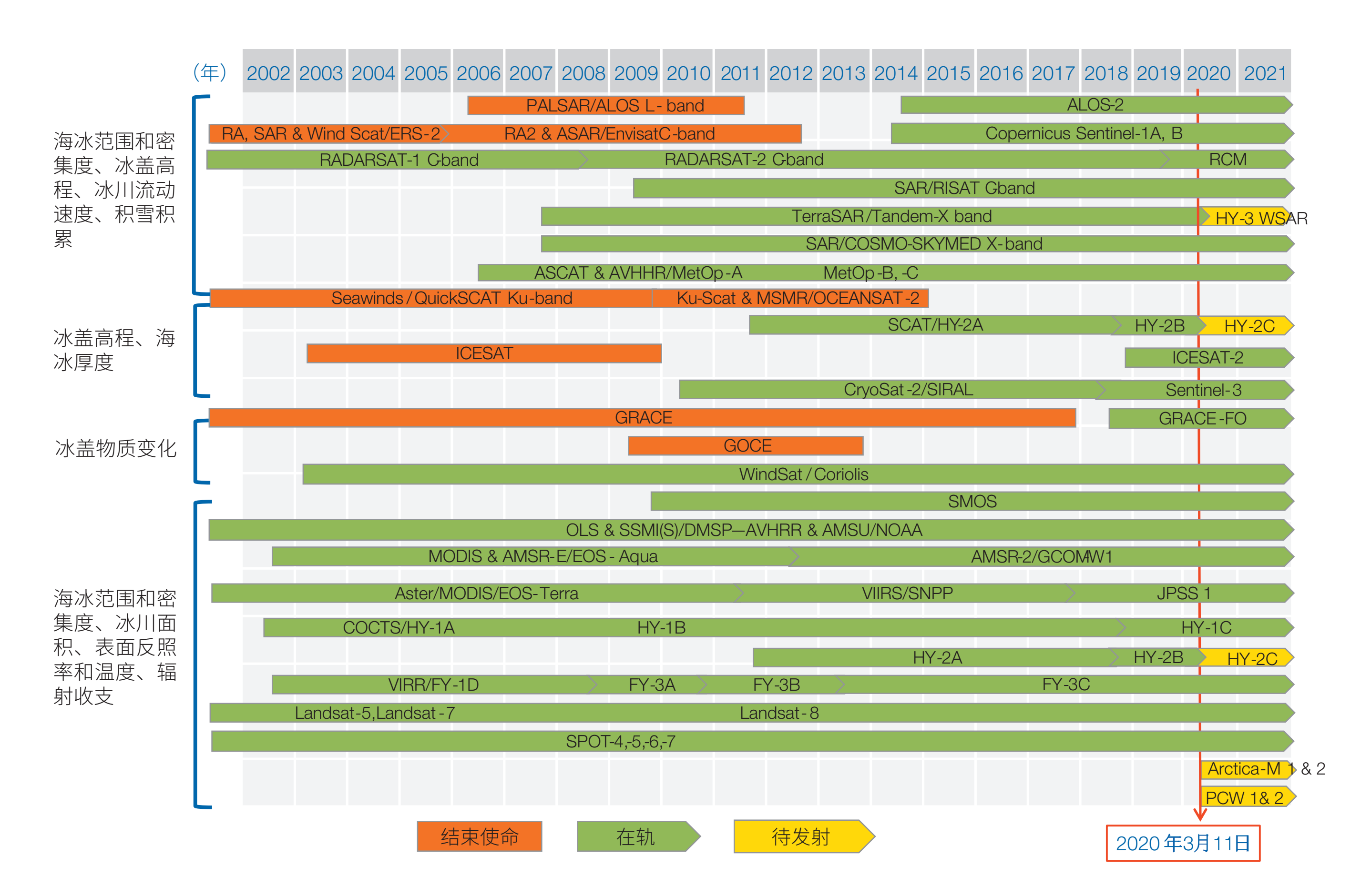


图 1　近 20 年来与冰冻圈有关的卫星计划

根据全球冰冻圈观测计划（GCW）修订和更新（https://globalcryospherewatch.org/satellites/overview.html）

素提取。

2.2 冰冻圈遥感应用研究进展

遥感技术最大的优势在于获取大范围冰冻圈要素的信息，最为显著的成就为利用多源遥感数据评估全球冰川物质平衡及对海平面上升的贡献量[5]。而南极、北极和山地冰冻圈遥感应用具有不同区域的科学问题和技术手段。山地冰冻圈遥感主要围绕冰川、积雪、冻土制图与变化监测，以及这些冰冻圈要素变化对区域生态环境和水资源的影响等开展遥感应用研究[6,7]。南极冰冻圈遥感应用研究除了评估南极冰盖物质平衡以外，主要针对冰架崩解、触地线、海冰等开展遥感监测；其中，南极制图也是一项重要的科学任务。根据被动微波亮度温度遥感数据获取的长时间序列海冰产品发现，与北极海冰快速减少不同，南极海冰过去数十年变化不大，甚至略有增加[8]。

在北极地区，主要科学问题包括格陵兰冰盖快速融化、北极海冰快速减少，以及冰冻圈退缩对北极航道的影响等；此外，北极气候放大效应、泛北极地区积雪变化、多年冻土退化产生的生态与工程效应也受到广泛关注。星载、机载和地基遥感观测在北极开展的研究较多，对于北极变化的认知有了较大提升；同时，全球也已发起较多北极观测研究的国际计划，如国际北极漂流冰站计划（MOSAiC）、全球冰冻圈观测计划（GCW）、北极综合观测系统项目（INTAROS）等。格陵兰冰盖与南极冰盖物质平衡均为负，但是其消融机理存在差异。主被动微波遥感资料均显示：格陵兰冰盖表面消融逐年增强，这使得冰盖表面反照率进一步降低以吸收更多的热量，加速了

融化；南极冰盖的消融主要在冰盖边缘，其物质损失以冰架崩解为主，事实上近年来也观测到南极冰盖表面的消融在加剧。毫无疑问，北极海冰快速减少是最值得关注的问题。利用遥感技术不仅能监测到海冰范围的减少，还能识别出海冰类型的变化，而遥感观测到的海冰表面融池的大小和数量正在成为海冰消融的关键因素[9]。

综上所述，对于区域冰冻圈遥感，北极地区目前被认为最重要，投入项目最多且成果也最多，是研究热点区域；南极地区主要是根据各国家的国力配置和科学家自由探索为主；山地冰冻圈则由各地区自主开展相关研究。

3 我国冰冻圈遥感进展

3.1 我国冰冻圈遥感的特点

我国冰冻圈遥感研究区域以青藏高原为主，进展较多、成果丰富；其中，最具有代表性的工作体现在冰川、积雪、冻土3个方面[10]。图2给出了我国第二次冰川编目、青藏高原冻土制图和积雪反演的最新结果。

（1）*在冰川遥感方面。*冰川遥感技术的不断成熟，为完成我国第一次冰川编目[11]和第二次冰川编目[12,13]作出了重要贡献；其历程经历了航空遥感解译、陆地卫星资料的大量应用、冰川自动化分类方法发展、冰川属性自动提取等阶段。近年来，我国学者在提取冰川物质平衡、冰川表面流速等方面也取得了突出成绩[14,15]。

（2）*在积雪遥感方面。*我国学者建立了长时间序列的积雪面积、雪深和雪水当量遥感产品，得到了广泛应用[16]。特别是利用“风云”气象卫星的被动微波亮度温度发展了我国的雪深反演算法[17]。此外，在光学遥感积雪面积产品去云方面也取得了具有特色的研究贡献[18]，初步解释了青藏高原地区过去40年积雪面积和雪深的时空变化[19]。受到青藏高原地形复杂等因素影响，目前遥感雪深产品的空间分辨率还有待进一步提高，以满足水文水资源研究的需求。

（3）*在冻土及冰缘环境遥感方面。*融合多源遥感信息的综合观测已经成为冻土制图的重要方法。目前，我国学者已得到了青藏高原热稳定性冻土分布及其长序列变化[20]。我国的主动微波遥感技术在地表形变、活动层厚度反演等方面也取得了快速进展，特别是合成孔径干涉雷达（InSAR）方面[7]，具有代表性的是利用被动微波亮度温度发展了地表冻融状态的决策树算法，制备了长时间序列地表冻融循环过程数据[21]。

3.2 我国北极冰冻圈遥感

近年来，我国北极冰冻圈遥感逐步开展，目前侧重在北极海冰监测和通航能力的研究。北极海冰遥感研究主要集中在两方面：海冰范围、类型、密集度等参数反演；海冰与全球气候变化关系。已在利用遥感卫星数据研究航道上海冰的季节和年际变化，分析通航影响因子，以及评估通航能力等方面取得了较好的进展[22]。

如前所述，北极地区除了海冰遥感，还涉及格陵兰冰盖、河冰和湖冰、积雪等诸多研究内容。我国学者近年来也逐步开展相关研究[23]，整体上侧重于遥感数据的分析和产品应用，而在遥感机理与反演方法方面开展较少。随着我国“冰上丝绸之路”倡议的提出和《中国的北极政策》白皮书的发布，北极即将成为我国冰冻圈遥感研究的热点地区。

3.3 我国南极冰冻圈遥感的特点

我国自1983年加入《南极条约》以来，南极测绘与遥感得到了很好的发展，主要涉及极地测绘、海冰、冰盖及冰架遥感监测等研究内容。*在极地测绘方面，*我国先后完成了典型地区大比例尺地形图测图，近年来开始冰下地形和海底地形测绘研究[24]。*在海冰遥感方面，*针对南极海冰范围、海冰类型、海冰密集度、表面反照率等遥感监测方面取得了诸多研究成果[25]。*在南极冰盖及冰架遥感监测方面，*对地形地

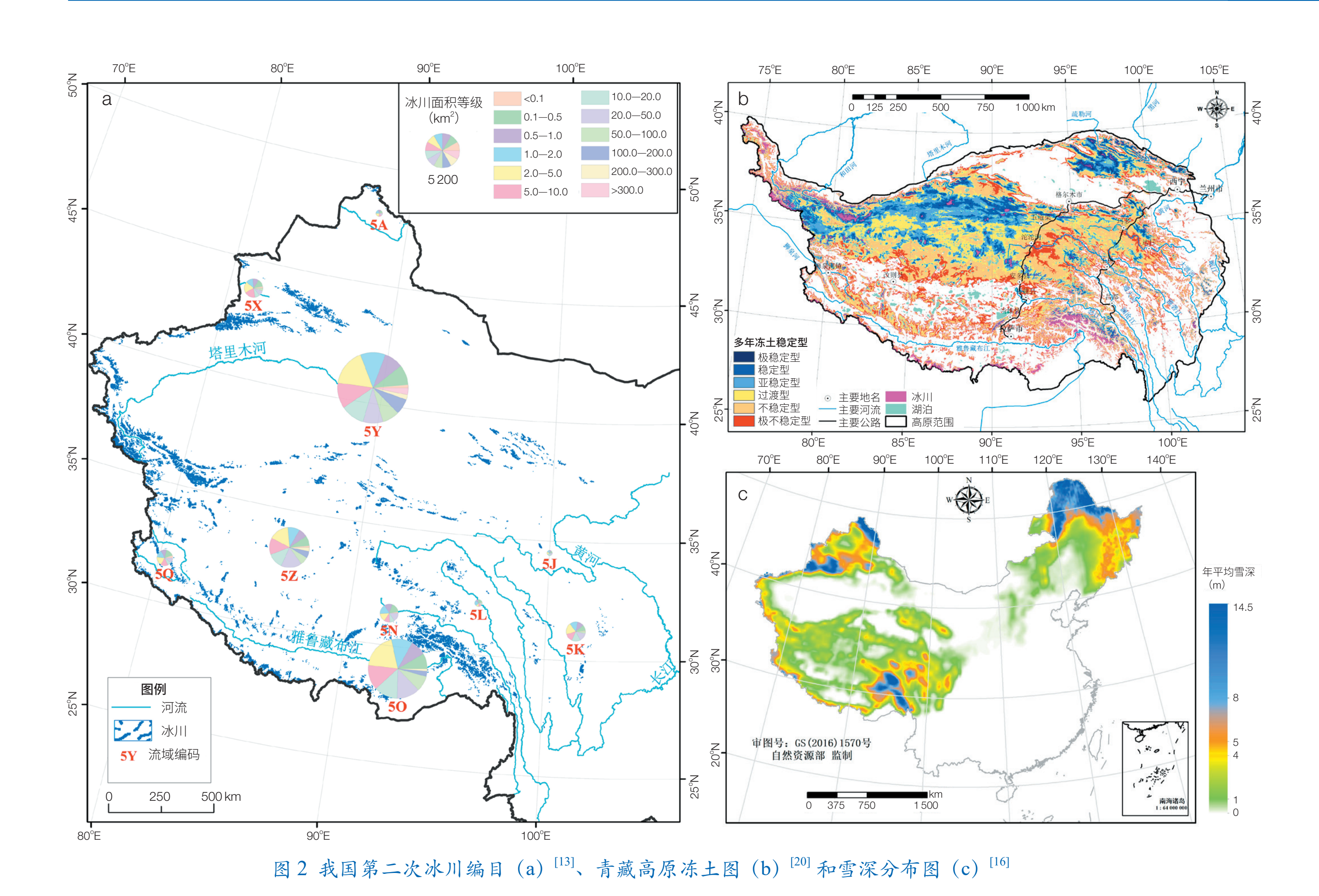


图 2 我国第二次冰川编目（a）[13]、青藏高原冻土图（b）[20] 和雪深分布图（c）[16]

貌、冰川流速、物质平衡、触地线、冰面特征、表面冻融、冰下湖等方面开展了实质性的研究工作，特别是冰架崩解对南极冰盖物质损失的贡献[26]。利用陆地资源卫星影像和卫星测高资料，研制了迄今全南极最高分辨率的冰川流速产品（图 3）；并在国际上首次发现东南极威尔克斯地冰川质量持续亏损，绕极洋流变暖可能是导致该冰川加速消融的主要原因[27]。随着我国南极航空探测计划的实施和多颗国产遥感卫星的先后发射，南极冰盖冰厚及其冰下地形、冰下湖泊遥感探测，以及国产卫星南极遥感应用可望形成新的研究热点。

4 冰冻圈遥感学科发展展望

4.1 加强冰冻圈遥感学理论和应用体系研究

冰冻圈遥感学目前仍是一个新兴的学科。随着多种新型遥感传感器的出现，冰冻圈遥感正面临新的机遇和需求。从学科本身发展的角度，需要进一步加强对冰冻圈要素，如冰川、冻土、积雪、河冰、湖冰、海冰及大气圈冰冻圈等要素的电磁散射和辐射模型的认识，深入理解冰冻圈要素的遥感散射和辐射机理与过程，为冰冻圈要素遥感反演提供理论支撑。尤其是大气冰冻圈遥感研究基础相对薄弱，需要给予特别关注。

冰冻圈涉及生态、水文、大气、海洋、灾害等相关学科。通过加强与这些学科的交叉融合，增强冰冻圈遥感在冰冻圈气候、水文、生态环境和灾害等方法的应用能力，从而在解决这些应用领域的科学问题方面发挥更大的作用。同时，冰冻圈科学与不同学科领域的发展又为冰冻圈遥感学提供新的科学问题和应用机遇。例如，光学、电子学、材料科学等学科的发展

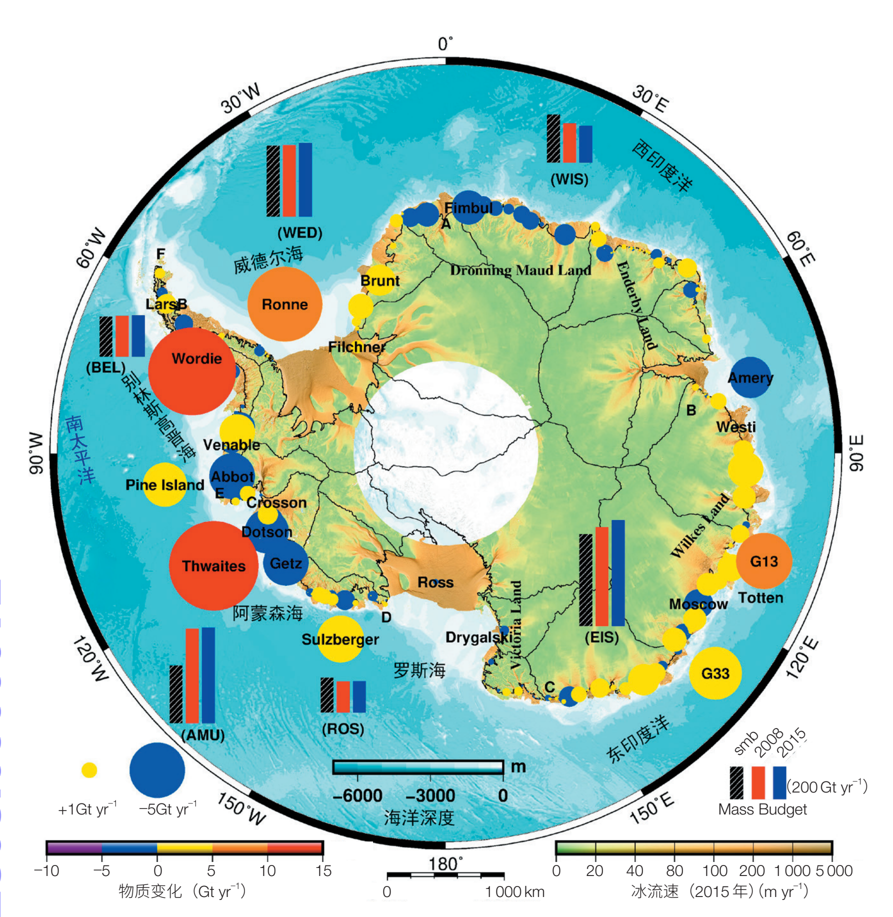


图 3 南极冰川运动速率（2015 年）和质量变化（2008—2015 年）[27]

为冰冻圈遥感获取数据提供先进的仪器设备，促进冰冻圈遥感学的发展。

随着冰冻圈变化对国家和地区的政治、社会、经济和可持续发展的影响不断增强，我国从事冰冻圈遥感学基础理论研究的人员和机构明显不足。因此，有必要在高等院校和研究所开设相关本科和研究生课程，增强公众对于冰冻圈遥感的认识，培养有志于从事冰冻圈遥感科学的人才和队伍。

4.2 助力国家“三极”科学计划

南极、北极和以青藏高原为主体的亚洲高山区是地球的“三极”，也是全球冰冻圈的核心分布区域①[28]。“三极”不仅蕴藏着全球最大的淡水资源，且油气资源丰富，是全球资源、能源开发潜在的战略性储备区域，对我国未来发展、国家利益和安全战略具有特殊的重要意义。同时，“三极”是全球气候变暖最为剧烈的地区和全球气候系统多圈层相互作用的典型区，也是影响全球气候与环境变化的关键区和敏感区，其在全球能量和水分循环中发挥着重要作用。因此，“三极”研究是地球系统科学多圈层耦合研究及“未来地球”自然-社会科学交叉研究的制高点，国内外科学家正在呼吁开展“三极”科学研究计划。

受自然条件和社会发展滞后等因素影响，“三极”地区生态环境地面观测能力非常有限，而遥感获取时空分布的对地观测数据能力则具有得天独厚的优势。尽管遥感已经为“三极”地区提供了大量的冰冻圈数据，但除了ICESAT卫星和CryoSat卫星之外，现有遥感计划的目标并不是为冰冻圈观测量身设计，“三极”地区的冰冻圈观测的优先度和数据获取能力都很低。例如，欧洲航天局计划2021年发射的BIOMASS卫星，在科学目标上将极地观测作为第二优先级。虽然近年来日本和中国等发射了一些专门针对极区观测的小卫星，但总体上并没有改变极区观测系统缺乏的局面。因此，为了开展“三极”科学研究计划，未来需加强研发空-天-地一体化的冰冻圈遥感观测系统。针对冰冻圈遥感的特殊观测手段和技术方法，需要加强3个方面的研究。

（1）充分利用现有卫星数据，制备极地基础地理信息和生态环境数据集。例如，利用高分辨率遥感数据摸清极地地形、海情、冰情、植被等基础地理环境

① Guo H, Li X, Qiu Y. Comparison of Global Change at Earth’s “Three Poles” using Spaceborne Earth Obervation. Science Bulletin. 2020, 65, In Press.

信息，利用中低分辨率但时间序列较长的遥感数据获取历史时期冰川、冰盖、积雪、海冰等冰冻圈和生态环境变化信息，从而为开展“三极”科学研究奠定基础数据支撑。

（2）发展针对冰冻圈科学研究的专门卫星遥感技术。微波波段的优势在于其穿透性。因此，可以考虑发射低频波段（如P波段）微波辐射计或者SAR卫星，开展以往探测不到的冰冻圈要素如冰川厚度、冰盖层析结构、冻土活动层厚度等。

（3）在提高极地环境观测重访周期方面，可以开展双星联合观测或者卫星组网观测，实现对极地海冰、冰川和冰盖等的快速变化监测。通过双星联合或者卫星组网还可以大幅提高干涉SAR测量数据质量，实现冰冻圈表面地形和形变监测。

（4）高空间分辨率重力卫星和大椭圆轨道通讯卫星也是未来极地冰冻圈科学研究的重要内容。我国目前正在制定和研发一些专门针对冰冻圈观测的卫星计划，需要快速推进。

参考文献

1 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2017.

2 Qin D, Ding Y, Xiao C, et al. Cryospheric Science: Research framework and disciplinary system. National Science Review, 2018, 5(2): 255-268.

3 曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感. 北京: 科学出版社, 2006.

4 李新, 车涛, 李新武. 冰冻圈遥感学. 北京: 科学出版社, 2020.

5 Zemp M, Huss M, Thibert E, et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. Nature, 2019, 568: 382.

6 Bolch T, Kulkarni A, Kaab A, et al. The state and fate of Himalayan Glaciers. Science, 2012, 336: 310-314.

7 Li X, Jin R, Pan X D, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau. International Journal of Applied Earth Observation And Geoinformation, 2012, 17(SI): 33-42.

8 IPCC. IPCC Special Report on the Oceas and Cryosphere in a Changing Climate. Geneva: IPCC, 2019.

9 Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis. Climatic Change, 2012, 110(3-4): 1005-1027.

10 Li X, Cheng G D, Jin H J, et al. Cryospheric change in China. Global and Planetary Change, 2008, 62(3-4): 210-218.

11 施雅风. 简明中国冰川编目. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.

12 Guo W Q, Liu S Y, Xu J L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 357-372.

13 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.

14 Zhou Y S, Li Z W, Li J. Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH-9 images and SRTM DEM. Journal of Glaciology, 2017, 63: 331-342.

15 Sun Y L, Jiang L M, et al. Spatial-temporal characteristics of glacier velocity in the Central Karakoram revealed with 1999-2003 Landsat-7 ETM+ pan images. Remote Sensing, 2017, 9(10): 1064.

16 Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.

17 Jiang L M, Wang P, Zhang L X, et al. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China. Science China-Earth Sciences, 2014, 57(6): 1278-1292.

18 Huang X D, Hao X H, Feng Q S, et al. A new MODIS daily cloud free snow cover mapping algorithm on the Tibetan

Plateau. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 2(6): 116-123.

19 车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1247-1253.

20 Ran Y H, Li X, Cheng G D. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau. Cryosphere, 2018, 12(2): 595-608.

21 Jin R, Li X, Che T. A decision tree algorithm for surface soil freeze/thaw classification over China using SSM/I brightness temperature. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2651-2660.

22 苏洁, 徐栋, 赵进平, 等. 北极加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征. 极地研究, 2010, 22(2): 104-124.

23 效存德, 陈卓奇, 江利明, 等. 格陵兰冰盖监测、模拟及气候影响研究. 地球科学进展, 2019, 34(8): 781-786.

24 王泽民, 谭智, 艾松涛, 等. 南极格罗夫山核心区冰下地形测绘. 极地研究, 2014, 26(4): 399-404.

25 Zhou C X, Zhang T, Zheng L. The characteristics of surface albedo change trends over the Antarctic sea ice region during recent decades. Remote Sensing, 2019, 11(7): 821.

26 Liu Y, Moore J C, Cheng X, et al. Ocean-driven thinning enhances iceberg calving and retreat of Antarctic ice shelves. PNAS, 2015, 112(11): 3263-3268.

27 Shen Q, Wang H, Shum C K, et al. Recent high-resolution Antarctic ice velocity maps reveal increased mass loss in Wilkes Land, East Antarctica. Scientific Reports, 2018, 8: 4477.

28 Li X, Che T, Li X W, et al. CAS Earth Poles: Big data for the Three Poles. Bulletin of the American Mathematical Society, 2020, 101, doi:10.1175/BAMS-D-19-0280.1.

Developing Cryospheric Remote Sensing, Promoting Scientific Programme of Earth's Three Poles

CHE Tao[1,2*] LI Xin[2,3] LI Xinwu[4] JIANG Liming[5,6]

(1 Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3 National Tibetan Plateau Data Center, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

5 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

6 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Remote sensing of cryosphere, as an important branch of cryospheric science, is a new interdiscipline, involving the knowledge of both cryospheric science and remote sensing techniques. This paper overviews the objects and basic methods of cryospheric remote sensing, introduces the progresses by using representative case studies, and especially, describes the research status of Chinese cryospheric remote sensing. Finally, we propose several recommendations for the development of remote sensing of

* Corresponding author

cryosphere. In particular, we discuss the potential paths to the scientific programme of Earth’s three poles.

Keywords cryosphere, remote sensing, Earth’s three poles, scientific programme



车 涛 中国科学院西北生态环境资源研究院遥感与地理信息科学研究室副主任、研究员，中国科学院黑河遥感站站长。主要从事冰冻圈遥感研究。发表研究论文100余篇，获国家省部级科技成果奖一等奖2项。E-mail: chetao@lzb.ac.cn

CHE Tao Professor of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is currently serving as the Deputy Director of Laboratory of Remote Sensing and Geospatial Science and the Director of Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, CAS. His research focuses on remote sensing of cryosphere. He has published more than 100 refereed journal articles and obtained two scientific awards at the ministerial and provincial levels. E-mail: chetao@lzb.ac.cn

■责任编辑：张帆